

文章编号:1007-2780(2021)02-0327-07

基于暗电流 CMOS 图像传感器固定模式噪声校正研究

李 强, 金龙旭*, 李国宁

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:为了抑制由读出放大电路增益不一致导致的 CMOS 传感器固定模式噪声(FPN),提高成像质量,本文提出了基于暗电流的固定模式噪声校正方法。该方法相比于传统校正方法具有校正系统简单,算法易于实现的优点。本文对校正前后的图像通过灰度方差进行评估,评估结果表明:由暗电流形成的本底图像,图像灰度方差校正后相比于校正前,降低 1~2 个数量级;均匀光照条件下的 CMOS 图像,校正后相比于校正前,图像灰度方差增大 2 个数量级。该评估结果及相关结论对暗电流本底图像及相关校正方法探讨具有一定的借鉴意义。

关键词:暗电流;CMOS 图像传感器;本底图像;固定模式噪声

中图分类号:TN492 文献标识码:A doi:10.37188/CJLCD.2020-0176

Fixed pattern noise correction of CMOS image sensor based on dark current

LI Qiang, JIN Long-xu*, LI Guo-ning

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to restrain the effect of CMOS image sensor fixed pattern noise(FPN) caused by the gain mismatch of readout amplifier circuit, to improve the quality of imaging, a method of fixed pattern noise correction based on the dark current is proposed in this paper. Compared with the traditional correction methods, this method has simple correction system, and the algorithm is easy to be implemented. The images before and after correction were evaluated via the grayscale variance, and the evaluation results show that in the background image formed by dark current, the grayscale variance of after corrected image reduced by 4 orders of magnitude compared with that before correction. As for the CMOS image under uniform illumination condition, the grayscale variance of after corrected image increased by 2 orders of magnitude compared with that before correction. The evaluation results and related conclusions are useful for the future study of dark current background images

收稿日期:2020-07-07;修订日期:2020-09-16.

基金项目:国家重点研发计划(No.2017YFB0404800)

Supported by National Key Research and Development Programs (No. 2017YFB0404800)

* 通信联系人, E-mail:jinlx@ciomp.ac.cn

and correlation correction methods.

Key words: dark current; CMOS image sensor; background image; fixed pattern noise

1 引言

随着半导体技术的发展,在固体成像技术中,CMOS 有源像素传感器具有功耗小、高分辨率、操作简单、片上系统集成方便等优点,使得 CMOS 应用越来越广泛,逐步替代 CCD 图像传感器^[1-2]。然而在 CMOS 应用过程中,由于 CMOS 传感器自身固有的结构特点,形成 CMOS 传感器的固定模式噪声(Fixed Pattern Noise, FPN),限制了 CMOS 图像传感器的应用。所以对 CMOS 图像传感器固定模式噪声的研究及相关校正技术的开发引起广泛关注。

CMOS 传感器 FPN 主要是指不随积分时间变化、在均匀光照条件下像元与像元之间输出响应的相对不一致性所形成的噪声。FPN 主要包括两种类型:(1)由输出放大电路偏置及像元暗电流所形成的偏置 FPN(Offset FPN),此类 FPN 通过帧间相减法可以有效抑制^[3-4];(2)由输出放大电路增益不一致性引入的增益 FPN(Gain FPN),此类 FPN 严重影响了图像质量。目前消除增益 FPN 噪声的方法有很多种:(1)基于神经网络非均匀性校正^[5];(2)基于估计的非线性校正^[1];(3)采用图像处理方法对 CMOS 图像数据进行低通滤波处理;(4)基于灰度补偿的非均匀性校正等^[6]。除了第 3 种处理方法外,其余校正方法都需要一个复杂的校正系统,在均匀光照条件下,采集 CMOS 图像,并计算相应的校正系数。此类方法尽管校正效果显著,但是校正系统及算法均复杂,并且在实时性与自适应性方面有很大的限制。

随着 CMOS 半导体工艺的发展,像元间的 FPN 最大为 1 LSB,1 s 积分时间暗电流本底图像最大输出仅仅为 0.5 LSB^[7]。本文深入分析 FPN 的形成机制,提出了一种基于暗电流固定模式噪声校正方法:在无快门情况下,基于暗电流本底图像,完成对 CMOS 图像传感器固定模式噪声校正。与传统方法相比较,此方法具有实时性、自适应性等优点,并且校正算法简单,不需要复杂的校正系统定期对 CMOS 传感器进行定标校正。所

以对此校正方法进行深入研究,具有实际意义。

2 CMOS 图像传感器结构及噪声分析

2.1 CMOS 图像传感器结构及工作原理

本文以安森美公司的 NOIP1SN1300A 图像传感器作为研究对象,具有像素内相关双采样(Correlated Double Sampling, CDS)功能。图 1 为传感器系统框图。

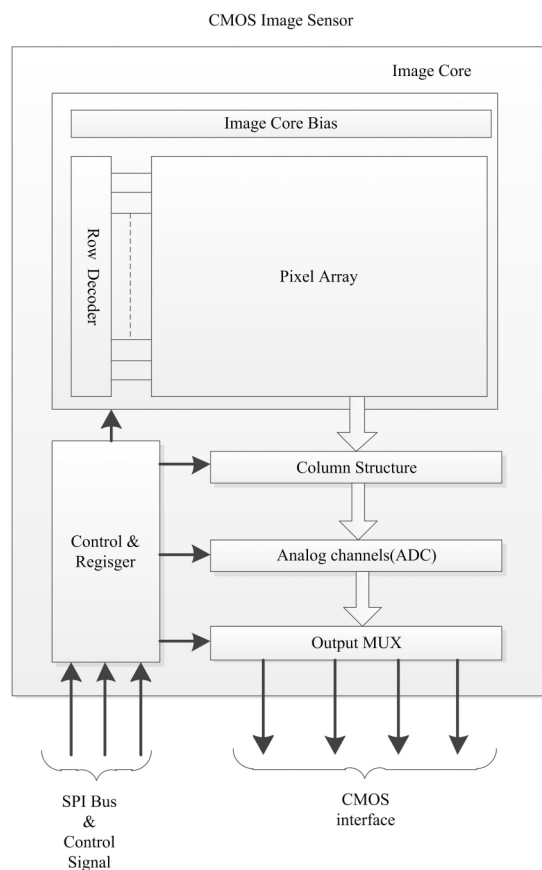


图 1 CMOS 图像传感器系统框图

Fig.1 Block diagram of CMOS image sensor

片外处理器通过 SPI (Serial Peripheral interface) 总线对传感器进行配置,控制信号(Control Signal)实现对传感器上电复位及积分时间控制。CMOS 传感器内部 Control & Register 模块产生相应时序控制信号,首先根据

积分时间控制信号完成光电转换过程,行译码器(Row Decoder)自上而下逐行选通像素矩阵(Pixel Array),列放大模块(Column Structure)具有多个相互独立模拟放大器,对当前选通的行像素所输出光电压进行放大,以提高动态响应范围。所以 CMOS 传感器在垂直方向上,同一列像素会共用一个模拟放大器。最后模拟通道(Analog channel)中集成的 ADC (Analog to Digital Converter)完成模拟量到数字量转换,通过输出选择器(Output Mux)输出数字图像数据。像素矩阵(Pixel Array)由独立像素按着一定的排列方式排列组成。

传统 3T 有源像素结构如图 2 所示,此像素结构由光电二极管 D1、复位晶体管 M1、源跟随器 M2 及选择晶体管 M3 组成。 C_{int} 为源跟随器 M2 等效寄生输入电容,RESET 与 SELECT 分别为复位控制信号及选择控制信号^[8]。

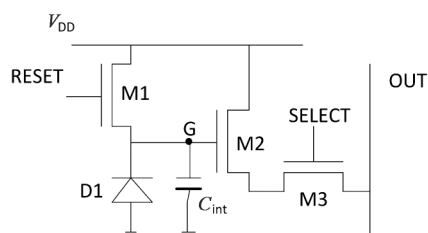


图2 3T 有源像元

Fig.2 Structure of 3T active pixel element

3T 像元控制时序简图如图 3 所示, T_1 时刻复位晶体管 M1 开启,寄生电容 C_{int} 复位充电, T_2 复位充电结束,此时光电二极管 D1 两端反向偏置电压为 V_{rst} 如式(1)所示:

$$V_{rst} = V_{DD} - V_{th}, \quad (1)$$

式中, V_{th} 为复位晶体管 M1 管压降。

T_2 时刻开始光电转换,光电二极管 D1 受到光照形成光电流,实现对寄生电容 C_{int} 放电,电压 V_G 如公式(2)所示:

$$V_G = V_{rst} - \frac{(I_{pd} + I_{leak}) \times T}{C}, \quad (2)$$

式中, I_{pd} 及 I_{leak} 分别为光电流及漏电流, T 为积分时间, C 为寄生输入电容 C_{int} 容值。设源极跟随器处于饱和状态,并且忽略开关信号 SEL 的影响,则像元光电响应输出与积分时间关系如式

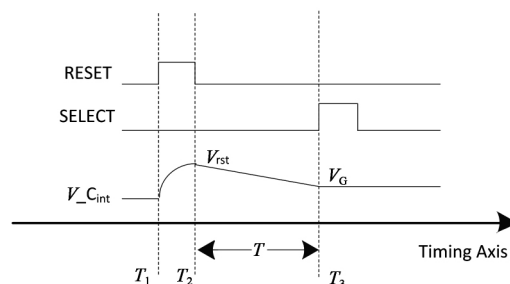


图3 像元控制时序简图

Fig.3 Control timing diagram of pixel element

(3)、(4)所示:

$$V_{out} = V_G - V_{GS,SF}, \quad (3)$$

$$V_{out} = V_{rst} - \frac{(I_{pd} + I_{leak}) \times T}{C} - V_{TN} - \sqrt{\frac{2I_B}{u_N C_{ox} W_{SF} / L_{SF}}}, \quad (4)$$

式(4)中, V_{TN} 、 W_{SF} 、 L_{SF} 为源极跟随器阈值电压,半导体材料有效长度和宽度, I_B 为偏置电流, u_N 为迁移率, C_{ox} 为单位面积栅极氧化物等效电容。像元输出到模拟读出电路如图 4 所示。

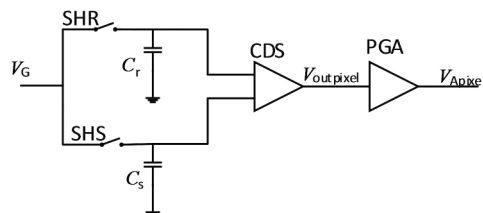


图4 模拟读出电路

Fig.4 Analog readout circuit

模拟读出电路包括 CDS 功能模块及可编程模拟增益放大器 PGA (Programmable Gain Amplifier):像元复位时刻,开关 SHR 关闭,复位电压储能电容 C_r 完成充电,充电完成后开关 SHR 保持开关状态。像元积分时间结束 T_3 , 开关 SHS 关闭,像元电压储能电容 C_s 进行充电,充电结束时,该电容两端电压为 V_{out} 。经过 CDS 后,像元输出 $V_{outpixel}$ 如式(5)所示:

$$V_{outpixel} = \frac{(I_{pd} + I_{leak}) \times T}{C}. \quad (5)$$

由式(5)可知,CDS 功能模块可以有效抑制由于复位电压和开关管等因素所引入的噪声。

V_{outpixel} 经过增益为 G 的可编程模拟增益放大器, 像元输出电压 V_{Apixel} 如式(6)所示:

$$V_{\text{Apixel}} = G \times V_{\text{outpixel}} + V_{\text{offset}}, \quad (6)$$

式中, V_{offset} 为放大器偏置电压, 以设置放大电路静态工作点, 确保电路工作在线性放大区。经 ADC 转换后, 最终量化为 10 bit 灰度值 V_{Npixel} :

$$V_{\text{Npixel}} = \frac{V_{\text{Apixel}}}{V_{\text{ref}}} \times 2^{10}, \quad (7)$$

式中, V_{ref} 为 ADC 转换器参考电压。

2.2 CMOS 图像传感器的 FPN 噪声分析

由式(5)、(6)可知:

$$V_{\text{Apixel}} = G \times \frac{(I_{\text{pd}} + I_{\text{leak}}) \times T}{C} + V_{\text{offset}}. \quad (8)$$

由式(8), CMOS 传感器 FPN 噪声主要来源于: (1) CMOS 像元中复位电压 V_{rst} 以及由于半导

体工艺引入的像元偏置 V_{TN} 与 $\sqrt{\frac{2I_{\text{B}}}{u_{\text{N}}C_{\text{ox}}W_{\text{SF}}/L_{\text{SF}}}}$,

由式(8)可知, 此类 FPN 通过像元内 CDS 能够被有效抑制甚至消除^[9]; (2) CMOS 像元中感光二极管

暗电流 I_{leak} 形成的本底偏置噪声 $G \times \frac{I_{\text{leak}} \times T}{C}$ 及

读出放大器所形成的偏置噪声 V_{offset} , 此类 FPN 通过帧间相减可以被有效抑制^[3-4]; (3) CMOS 像元

感光元件的光电响应不一致性所形成的 FPN, 主要表现为光电流 I_{pd} 的不一致性。随着半导体工艺

发展, 同一芯片上集成封装感光元件具有很好的一致性^[10-11], 在本文中暂时忽略此类 FPN 影响; (4)

CMOS 传感器输出电路中模拟放大电路增益 G 的不一致性, 此类不一致性对 CMOS 图像的 FPN 影响较大^[10-11]。

3 基于暗电流的固定模式噪声校正

由公式(8)可知, 由暗电流所形成像元本底图像:

$$V_{\text{Apixeldark}} = G \times \frac{I_{\text{leak}} \times T}{C} + V_{\text{offset}}. \quad (9)$$

光电二极管反向漏电流, 在很小的反向电压变化范围内, 漏电流 I_{leak} 在温度不变条件下近似恒定。由公式(9)可知: (1) 像元本底图像与积分时间 T 成线性关系; (2) 两幅本底图像采集积分时间分别为 T_1 与 T_2 , 且 $T_1 > T_2$, 并进行帧间相减处理, 消除由放大器引入的偏置噪声 V_{offset} , 则

单个像元本底输出变化量为:

$$\delta V_{\text{floor}} = G \times \frac{I_{\text{leak}} \times (T_1 - T_2)}{C}. \quad (10)$$

基于以上分析, 提出基于暗电流 CMOS 固定模式噪声校正方法, 具体流程图如图 5 所示。

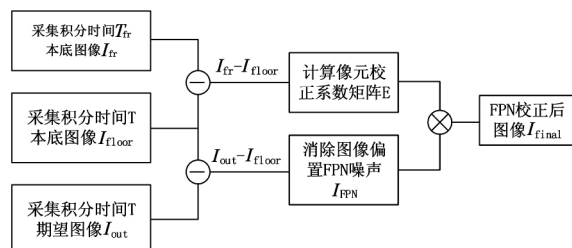


图 5 基于暗电流 CMOS 固定模式噪声校正流程图

Fig.5 CMOS FPN noise correction flow chart based on dark current

具体步骤描述如下:

(1) 采集积分时间为 T_{fr} , 本底图像 I_{fr} 作为本底参考图像。

(2) 采集积分时间为 T , 且 $T < T_{\text{fr}}$, 期望 CMOS 图像 I_{out} 。

(3) 采集积分时间同为 T , 本底图像为 I_{floor} 。

(4) 本底图像输出变化量 $\delta I_{\text{floor}} = I_{\text{fr}} - I_{\text{floor}}$, 则第 i 行, 第 j 列像元校正系数 E_{ij} :

$$\left\{ \begin{aligned} E_{ij} &= \frac{\left(\sum_{i=1, j=1}^{i=M, j=N} \delta I_{\text{floor}ij} \right)}{(M \times N) \delta I_{\text{floor}ij}} \\ E_{ij} &\approx \frac{\left(\sum_{i=1, j=1}^{i=M, j=N} G_{ij} \right)}{(M \times N) G_{ij}} \\ E_{ij} &= \frac{\bar{G}}{G_{ij}} \end{aligned} \right., \quad (11)$$

式中, M, N 分别为 CMOS 传感器输出图像行列尺寸。

(5) 帧减法消除偏置噪声 I_{FPN} , 由式(7)、(9)得出:

$$\left\{ \begin{aligned} I_{\text{FPN}ij} &= I_{\text{out}ij} - I_{\text{floor}ij} \\ I_{\text{FPN}ij} &= \frac{G_{ij} \times I_{\text{pd}ij} \times T}{C} \times \frac{2^{10}}{V_{\text{ref}}} \end{aligned} \right. \quad (12)$$

(6) 最终校正后输出图像 $I_{\text{final}ij}$:

$$I_{\text{final}ij} = I_{\text{FPN}ij} \times E_{ij} \quad (1 < i < M, 1 < j < N). \quad (13)$$

为了探究由暗电流所形成的本底图像与积分

时间关系,将图像采集系统置于暗室,同时遮挡镜头,以 100 ms 为起始积分时间,3 000 ms 为终止时

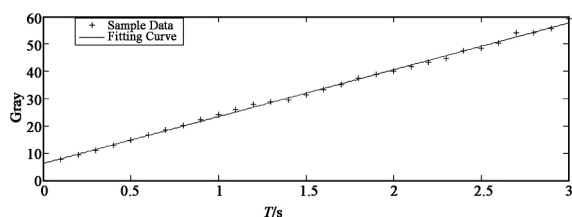


图 6 图像灰度与积分时间拟合曲线

Fig.6 Fitting curve of image gray and integral time

间,100 ms 为步长。每一个积分时间采集 10 幅本底图片。求出图像灰度均值并通过最小二乘法进行曲线拟合,拟合曲线如图 6。

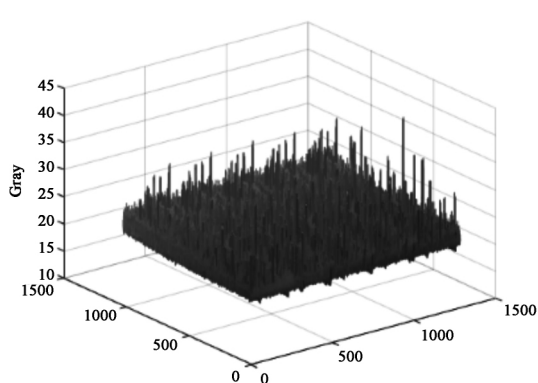
由图 6 可知,CMOS 传感器本底图像输出与积分时间具有较好的线性关系,进一步验证了式(9)的正确性。

对不同积分时间的本底图像进行非均匀性校正处理,计算校正前后方差结果如表 1。1 s 积分时间本底图像校正前后对比如图 7 所示。

表 1 本底图像校正前后对比

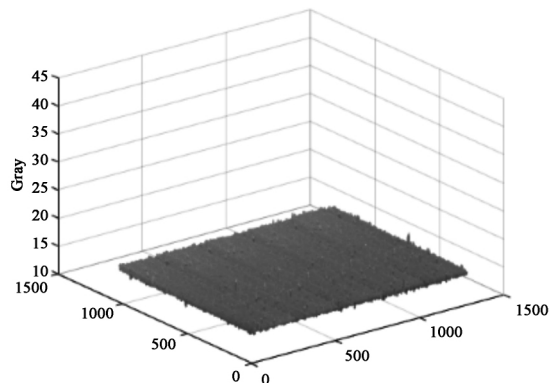
Tab.1 Comparison between before and after correction of floor image

Integration time	0.5 s	1 s	1.5 s
Before correction average	6.853 1	15.914 9	25.223 3
Before correction variance	$5.412 6 \times 10^{-4}$	1.23×10^{-2}	4.88×10^{-2}
After correction average	6.851 4	15.912 4	32.869 4
After correction variance	$8.124 3 \times 10^{-6}$	$2.383 7 \times 10^{-4}$	3.2×10^{-3}



(a) 1 s 校正前

(a) 1 s before correction



(b) 1 s 校正后

(b) 1 s after correction

图 7 1 s 积分时间本底图像校正前后对比图

Fig.7 Comparison between before and after correction for 1 s dark

4 实验验证及分析

如前所述,本底图像是在没有光照条件下,本实验采用 150 W 钨灯作为光源,照明积分球产生均匀漫反射光,积分球采用 Labsphere 公司生产的 xth-2000c 型号,开口直径为 50.8 cm (20 in)。实验系统实物图如图 8 所示。

分别采集两个积分时间 CMOS 图像,为了排除 RGB 三基色光电转化效率的影响,对输出图像的三基色 RGB 分别求取方差,校正前后对比结果

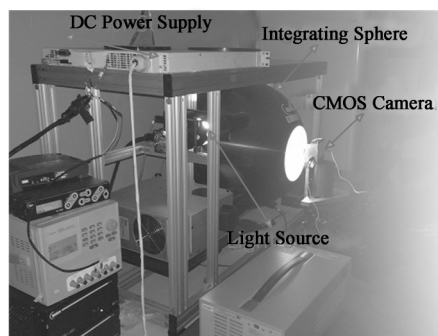


图 8 实验系统实物图

Fig.8 Experiment system setup

如表 2 所示。实验结果表明:(1)本底图像输出与积分时间具有较好的线性关系;(2)对于本底图像 FPN 进行校正,具有很好的校正效果,图像方差降低 1~2 个数量级;(3)对均匀光照条件下 CMOS 图像进行校正,发现校正后图像方差增大 2 个数量。经过分析,在暗电流固定模式噪声校正方法中,以 CMOS 各像元之间暗电流 I_{leak} 相等为前提条件,校正系数 $E_{ij} = f(G_{ij})$ 。但实际应用过程中,像元间暗电流 I_{leak} 存在非一致性,实际校正系数 E_{ij} 为暗电流 I_{leak} 与放大器增益 G 的函

数,即 $E_{ij} = f(I_{\text{leak}ij}, G_{ij})$ 。所以对本底图像校正具有较好效果。但是对于均匀光照 CMOS 图像,消除偏置 FPN 图像 I_{FPN} 为光电流 I_{pd} 及放大器增益 G 的函数,即 $I_{\text{FPN}ij} = g(I_{\text{pd}ij}, G_{ij})$,校正后图像 $I_{\text{final}ij} = g(I_{\text{pd}ij}, G_{ij}) \times f(I_{\text{leak}ij}, G_{ij})$,对于均匀光照条件下进行的暗电流 FPN 校正,由于每一像元间的光电响应度不一致性所引入的 FPN 噪声影响显著,导致最终校正前后的图像灰度方差反而增大 2 个数量级。暗电流方法适用于暗场 FPN 校正。

表 2 均匀光照下校正前后对比结果

Tab.2 Comparison between before and after correction under uniform lighting condition

Integration time	50 μs			100 μs		
Primary color	R	G	B	R	G	B
Before correction average	97.250 9	114.269 8	116.701 1	212.176 1	249.306 9	254.611 3
Before correction variance	5.863 9	7.664 6	3.262 8	3.791 0	5.733 1	3.359 7
After correction average	98.543 2	116.328 1	118.251 8	214.571 2	252.123 5	256.981 5
After correction variance	188.122 5	123.554 5	146.103 4	136.281 5	99.210 2	135.136 5

5 结 论

本文深入分析 CMOS 传感器 FPN 噪声形成机理及影响因素,针对由读出放大电路增益不一致引入的增益 FPN,提出了基于暗电流的固定模式噪声校正方法,分别对本底图像及均匀光照图像进行校正处理,并比对校正前后的图像计算灰度方差。结果表明:对本底图像的校正效果明显,

校正后图像灰度方差降低,而对均匀光照图像处理,图像灰度方差增大。尽管当前 CMOS 工艺已达到像元间 FPN 最大 1 LSB,在均匀光照条件下,单个像元光电响应不一致性导致校正后图像方差增大。所以由像元的光电响应不一致所导致的 FPN 在光照情况下不能忽略,并且有较严的影响。该结果对由暗电流形成的本底图像及固定模式噪声校正方法的深入研究具有一定的参考意义。

参 考 文 献:

- [1] 王华,曹剑中,王华伟,等.基于估计方法的 CMOS 图像传感器列固定模式噪声校正方法[J].红外与激光工程, 2013,42(7):1928-1932.
WANG H, CAO J Z, WANG H W, et al. Column fixed pattern noise correction of the CMOS image sensor based on estimation method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1928-1932. (in Chinese)
- [2] 周彦平,王晓明,常国龙,等.CMOS 图像传感器的辐射实验[J].红外与激光工程,2011,40(7):1270-1273.
ZHOU Y P, WANG X M, CHANG G L, et al. Radiation experiment of CMOS image sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1270-1273. (in Chinese)
- [3] 孙权,姚素英,郑炜.一种实时 CIS 暗电流校正方法及系统实现[J].光电子·激光,2013,24(1):21-27.
SUN Q, YAO S Y, ZHENG W. Real-time calibration and implementation of dark current in CIS [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2013, 24(1): 21-27. (in Chinese)
- [4] CHENG H Y, KING Y C. A CMOS image sensor with dark-current cancellation and dynamic sensitivity operations

- [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2003, 50(1): 91-95.
- [5] 陈宝国,张学峰,牛英宇.改进的基于神经网络的非均匀性校正算法[J].*红外与激光工程*, 2013, 42(3): 575-578.
CHEN B G, ZHANG X F, NIU Y Y, *et al.* Improved nonuniformity correction algorithm based on neural network [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 575-578. (in Chinese)
- [6] LIU Z W, XU J T, WANG X L, *et al.* A fixed-pattern noise correction method based on gray value compensation for TDI CMOS image sensor [J]. *Sensors*, 2015, 15(9): 23496-23513.
- [7] ON Semiconductor. NOIP1SN1300A-Ddatasheet; PYTHON 1.3/0.5/0.3 MegaPixels Global Shutter CMOS Image Sensors [Z]. 2016.
- [8] CHEN N, ZHONG S Y, ZOU M, *et al.* A low-noise CMOS image sensor with digital correlated multiple sampling [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2018, 65(1): 84-92.
- [9] HYNCECEK J. Theoretical analysis and optimization of CDS signal processing method for CCD image sensors [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1992, 39(11): 2497-2506.
- [10] KOREN I, RAMACHER U, GEIB H, *et al.* Robust digitization and digital non-uniformity correction in a single-chip CMOS camera [C]//*Proceedings of the 25th European Solid-State Circuits Conference*. Duisburg: IEEE, 1999.
- [11] BLANKSBY A J, LOINAZ M J. Performance analysis of a color CMOS photogate image sensor [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2000, 47(1): 55-64.

作者简介:



李 强(1985—),男,吉林长春人,硕士,2019 年于吉林大学获得硕士学位,主要从事显示成像、光电成像及图像处理方面的研究。E-mail:14107666@qq.com



金龙旭(1965—),男,吉林长春人,博士,研究员,2003 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光电成像及图像处理方面的研究。E-mail:jinx@ciomp.ac.cn